

我国甜菜夜蛾大尺度暴发频度与广域温度和广域降雨量关系的预测模型

文礼章^{1,*}, 张友军²

(1. 湖南农业大学生物安全科学技术学院, 长沙 410128; 2. 中国农业科学院蔬菜花卉研究所, 北京 100081)

摘要: 甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner) 是我国多种农作物上的重要害虫, 在我国许多地区频繁暴发成灾。为探索甜菜夜蛾种群动态规律并建立种群数量发生趋势预测模型, 作者应用时间序列分析和逐步回归分析方法研究了我国广域(较大范围)温度和广域降雨量变化趋势对我国广域甜菜夜蛾年暴发频度的影响规律。结果表明: 甜菜夜蛾发生的长期趋势和年间波动状况均与广域温度和广域降雨量具有复杂的影响关系。在 1979–2008 年间, 我国甜菜夜蛾暴发频度呈现出波浪式上升趋势, 其暴发指数平均年递增率为 0.076, 而我国广域温度(以 27 个省市级气象台数据统计为例)在 1990–2008 年间的平均年递升率为 0.039℃, 即我国甜菜夜蛾暴发频度上升趋势与我国广域温度升高趋势同向而行。作者从 52 个因素(当年和上年 1–12 月各月及全年日均温和月均降雨量)中筛选出了具有显著回归影响($P < 0.05$ 或 0.01)的 10 个因素进入回归模型, 初步找出了能够预测广域甜菜夜蛾暴发趋势指数的温度与降雨量或其组合因素, 并使其模型达到 99% 以上的历史符合率和预测准确度。作者认为, 广域温、雨因素与广域甜菜夜蛾暴发趋势指数的这种密切相关性, 不是偶然的巧合, 而是必然的环境(温度和降雨量)作用于生物(甜菜夜蛾)的因果关系。

关键词: 甜菜夜蛾; 预测模型; 广域温度; 广域降雨量; 时间序列; 逐步回归; 趋势预测

中图分类号: Q968 文献标识码: A 文章编号: 0454-6296(2010)12-1367-15

Modelling of the relationship between the frequency of large-scale outbreak of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Lepidoptera: Noctuidae) and the wide-area temperature and rainfall trends in China

WEN Li-Zhang^{1,*}, ZHANG You-Jun² (1. College of Bio-safety Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. The Institute of Vegetables and Flowers, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner), is a major agricultural pest in China, which frequently breaks out in many parts of China in the last 20 years. To explore the rule of the population dynamics and to establish the forecasting mode of population trends of *S. exigua* in quantity, the time series analysis and stepwise regression analysis methods were used for studying the law of wide-area (greater range) atmospheric temperature and rainfall influence on outbreak frequency of *S. exigua* in China. The results indicated that the wide-area temperature and rainfall had a complex effect on the long-term trends and fluctuations of *S. exigua* outbreak frequency. During 1979–2008, the frequency of the beet armyworm outbreaks in China showed an upward trend wave, and its average annual growth rate of the outbreak index was 0.076, while the wide-area temperature of China (taking the 27 city-level observation points as a statistics example) in the years 1990–2008 increased at the average annual incremental rate of 0.039℃, showing a rising frequency of the beet armyworm outbreak with wide-area temperature rising trend. Ten factors, which had a significant effect ($P < 0.05$ or 0.01) on the regression forecasting model and could be used to forecast quantitatively a wide-area outbreak trend index of *S. exigua* (the forecast accuracy of the simulation model was more than 99%), were screened out from 52 factors (the temperature and rainfall of the monthly and annual average of January to December of the current year and last year). The author believes that this close relationship between the wide-area temperature, rainfall factors and the beet armyworm outbreak trend index is not a mere coincidence, but a necessary consequence of environments

基金项目: 农业部国家公益科研专项甜菜夜蛾行业项目(200803007)

作者简介: 文礼章, 男, 1956 年生, 湖南人, 博士, 教授, 主要从事农业昆虫、资源昆虫与昆虫生态教学与科研

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: weninsect123@yahoo.com.cn

收稿日期 Received: 2010-05-11; 接受日期 Accepted: 2010-10-27

(temperature and rainfall) acting on creatures (beet armyworm).

Key words: *Spodoptera exigua*; forecast model; wide-area temperature; wide-area rainfall; time series analysis; stepwise-regression analysis; trend forecasting

已有许多研究表明,温度和降雨量对农业害虫的发生发展动态起着至关重要的调节作用(马骏等,1999;韩兰芝等,2003;王竑晟等,2004;郭建平等,2005)。从生态学角度看,温度主要通过促进或抑制昆虫发育速率、生长量、存活力、生殖力、迁飞、扩散或交配行为等作用方式来影响昆虫种群动态,况且,不同害虫种类或种群对温度变化的敏感性和极端温度(高温或低温)的耐受性存在着一定的差异(徐金汉等,1999;王竑晟等,2004;薛敏生等,2008)。因此,探索和揭示温度和降雨量对害虫发生发展动态的影响规律,并力图借用气象机构记录的系列温度和降雨量数据来分析和预测农业害虫种群的未来变化趋势,已成为农业昆虫学和昆虫生态学中最为活跃的研究领域之一。甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* (Hübner) 是一种世界性的多食性害虫。自1990年以来,甜菜夜蛾暴发的频度不断提高,已成为制约我国农业生产发展的一种重要害虫(邓建明,1992;吴淑秀,1992;罗礼智等,2000;许国庆等,2000)。甜菜夜蛾有间歇性暴发的特性,尤其在每年的7-9月份高温干旱季节易暴发成灾,严重威胁蔬菜、棉花 *Gossypium hirsutum* 等农作物生产(敖成光等,2002;刘轩武等,2002;徐文华等,2006;姚士桐等,2008)。

近年来,人们已开始从不同角度探讨甜菜夜蛾暴发成灾的原因或机理,综合各家学者的研究成果和发表的观点,我们可将甜菜夜蛾暴发成灾的原因归纳为四大类:第一是气候适宜论,如国内外专家普遍认为,夏秋季节高温干旱是导致甜菜夜蛾大发生的重要条件(李月秋等,1998;罗礼智等,2000;祝树德等,2003;李志敏等,2008),而多雨则不利于甜菜夜蛾的生长发育,多雨在一定程度上可限制甜菜夜蛾的繁殖速度,并认为雨后高湿,有利于甜菜夜蛾病原菌的大量繁殖、传播,可降低甜菜夜蛾发生数量(蒋杰贤等,2004;薛敏生等,2008);第二是食物丰富论,有学者认为,甜菜夜蛾食性杂,可危害多科多种农作物(如棉花、各类蔬菜、旱粮等),特别是近年来,蔬菜种植面积和复种指数逐年提高,大面积连年成片种植十字花科、豆科作物或棉-菜间种套种以及冬季大棚蔬菜面积的扩大,为甜菜夜蛾提供了充足的食料,有利于甜菜夜蛾越

冬和增加虫源基数,因而导致甜菜夜蛾大发生(江幸福等,1999;刘轩武等,2002;吴承春和王沫,2003);第三是天敌杀伤论,不少研究者认为,大量使用化学杀虫剂,在防治害虫的同时也杀伤了大量天敌,减少了田间天敌的种类和数量,降低了天敌多样性,破坏了害虫与天敌系统的平衡,使害虫失去了自然控制因子,因而导致甜菜夜蛾大发生(敖成光等,2002;林珠凤等,2007);第四是害虫抗药性论,有研究结果表明,频繁、大量使用杀虫剂,除了使甜菜夜蛾产生抗药性,使得大多数杀虫剂失效外,还可提高害虫的繁殖能力,从而导致害虫再猖獗。甜菜夜蛾产生抗性的杀虫剂种类包括有机磷、有机氯、氨基甲酸酯、拟除虫菊酯、苯甲酰脲及多杀菌素等多类杀虫剂。甜菜夜蛾对杀虫剂逐渐产生抗性后,越来越不敏感,使得大部分用于防治甜菜夜蛾的杀虫剂已失去或逐渐失去防治效果(赵建周和吴世昌,1995;王开运等,2001;兰亦全等,2005;袁永达等,2006;司升云等,2009)。

目前,关于温度和降雨量对甜菜夜蛾种群动态影响规律的研究,主要局限于实验种群和局部地区大气温度和降雨量对当地种群的影响,并且取得比较统一的共识,即高温干旱是甜菜夜蛾大发生的重要诱因之一,这为利用温度动态预测害虫动态提供了重要理论依据。本文在前人研究的基础上,对我国27个城市气象台的综合平均温度和平均降雨量抽样作为广域温度和降雨量代表,研究其变化动态对甜菜夜蛾暴发频度的影响规律,探索广域温度和降雨量变动趋势对农业害虫种群长期趋势动态的关联程度和定量关系,结果表明,我国甜菜夜蛾暴发频度(或暴发指数)随着广域温度和降雨量的变动而有规律的变动,而且前一年和当年某些月份的广域平均温度和平均降雨量的高低可直接影响后一年或当年甜菜夜蛾广域发生的总体轻重程度,从而为提前做好防治甜菜夜蛾准备提供依据。现将分析结果报道如下。

1 材料和方法

1.1 甜菜夜蛾发生量评价指标的选择

1.1.1 暴发年频次: 为了系统研究我国广域温度和降雨量对甜菜夜蛾暴发频度的影响规律,首先必

须获取较长时间内连续系统的观测或调查数据。本文利用现代电子数据库以及中国国家图书馆\中国科学院图书馆等纸质文献馆藏单位或部门，查阅和收集了自 1915 – 2008 年 84 年间我国各类农业期刊甜菜夜蛾相关文献 6 157 篇，通过分析其文献间的关联性和隐含信息，挖掘和筛选与我国甜菜夜蛾大发生年或大发生地相关的内容，经过提取和对比分析，

得出我国甜菜夜蛾在 1915 – 2008 年 84 年间发生的暴发年频次合计为 120 次，其中 1915 – 1955 年 40 年间为 0 次，1956 – 1990 年 34 年间有 11 次，而在 1991 – 2008 年 18 年间共有 109 次，占总次数的 90.83%。由于本文所能获得的可用于分析的广域温度和广域降雨量资料仅来源于 1991 – 2008 年，故表 1 中只列出了相应年度的甜菜夜蛾暴发年频次值(表 1)。

表 1 我国 1991 – 2008 年甜菜夜蛾历年发生暴发年频次、趋势指数及对应年份的广域各月平均温度值(℃)
(根据相关文献资料综合计算整理)

Table 1 Year frequency and the trend index of outbreak of *Spodoptera exigua* and the wide-area temperature of China between 1991 and 2008 (calculated and summarized based on related literatures)

年份 Year	我国广域(抽样 27 个省市级气象台统计数据)平均温度值(℃) Wide-area mean temperature (sampled from 27 cities of China)													暴发年频 次 Year frequency y_i	暴发趋势 指数 Trend index I_i
	1 月 Jan.	2 月 Feb.	3 月 Mar.	4 月 Apr.	5 月 May	6 月 Jun.	7 月 Jul.	8 月 Aug.	9 月 Sep.	10 月 Oct.	11 月 Nov.	12 月 Dec.	年均 Mean		
	x_{1j}	x_{2j}	x_{3j}	x_{4j}	x_{5j}	x_{6j}	x_{7j}	x_{8j}	x_{9j}	x_{10j}	x_{11j}	x_{12j}	x_{mj}		
1991	0.32	3.71	8.54	15.09	19.04	23.29	25.57	24.62	20.64	14.44	7.75	2.14	13.76	9	2.30
1992	0.49	2.77	7.19	14.98	19.27	22.51	25.19	24.33	20.19	13.10	7.64	2.66	13.36	1	0.69
1993	-1.25	4.23	8.40	14.06	18.86	23.19	24.47	23.69	20.36	14.27	7.20	1.54	13.25	1	0.69
1994	0.93	2.76	6.56	14.91	20.15	23.64	26.23	25.32	20.09	14.03	9.82	2.92	13.95	5	1.79
1995	0.31	3.13	8.27	14.05	19.51	23.36	25.41	24.59	18.97	15.29	8.28	2.20	13.61	2	1.10
1996	0.19	1.97	7.04	13.10	19.51	23.39	25.09	24.42	21.09	15.11	7.79	2.91	13.47	1	0.69
1997	0.65	3.28	9.42	14.79	20.41	23.20	25.85	25.40	19.42	14.99	8.28	2.06	13.98	5	1.79
1998	-0.20	4.83	8.42	17.20	19.86	22.55	25.94	25.18	21.72	16.35	9.71	3.91	14.62	2	1.10
1999	1.97	5.15	7.89	15.45	19.24	23.42	25.20	24.21	21.70	15.12	8.59	2.58	14.21	19	3.00
2000	-0.71	1.80	8.84	14.89	20.66	23.87	26.48	24.60	20.91	14.56	6.68	3.21	13.82	14	2.71
2001	0.43	3.15	9.24	14.60	20.58	23.25	26.37	24.29	20.98	15.78	8.53	1.29	14.04	11	2.48
2002	2.56	5.73	10.49	15.12	19.36	22.93	25.64	24.19	20.32	14.36	7.62	1.43	14.15	9	2.30
2003	0.30	4.35	8.20	14.89	19.82	23.19	25.39	24.80	20.75	14.97	8.06	2.24	13.91	5	1.79
2004	0.22	4.98	8.80	16.05	19.59	23.30	25.27	24.30	20.53	14.46	8.15	2.69	14.03	7	2.08
2005	-0.80	3.06	7.47	16.16	20.06	24.64	26.10	24.62	21.64	15.06	9.68	0.80	14.04	1	0.69
2006	0.71	3.01	9.03	15.45	19.14	23.97	26.12	25.64	20.44	17.09	9.71	2.75	14.42	6	1.95
2007	0.99	6.13	9.23	14.64	21.29	23.82	25.74	25.23	20.77	15.19	8.47	3.56	14.59	5	1.79
2008	-1.25	0.89	10.39	15.63	20.46	23.19	25.77	24.63	21.27	15.88	8.48	2.85	14.02	6	1.95

$I_i = \ln(y_i + 1)$.

值得指出的是，本文采用的甜菜夜蛾“暴发年频次”标准并非具有固定的害虫密度或危害程度定量标准，而是认可各地或各文献作者已经认可的暴发年度，为当地的一个暴发年。如 1999 年全国有 19 个不同地区报道当年为甜菜夜蛾暴发年，因此，1999 年全国甜菜夜蛾暴发的年频次为 19 次，其余年份依此类推。

根据已查文献资料统计得知，甜菜夜蛾暴发年的判别标准是比较复杂的，各地区和各作者因作物不同或调查统计方法不同而使用了不同的描述方法

和术语，根据本次笔者所查阅的文献中所报告的甜菜夜蛾“暴发年”的判别依据来看，各报道地区或报道作者大多都没有遵循一个什么既定的大发生、小发生标准，而主要是凭当地生产者的感性认识所确定的，至多是提供一些表达发生量或危害程度的数量概念，而且表述这些数量概念的量化指标也有很大差异，如有的用百株卵块数，有的用百株幼虫数，有的用发生面积，有的用损失百分数等，种类繁多，读者难以用一个固定的标准去评价这些指标是等价的还是不等价的，更难肯定或否定各地或各

作者认可的暴发年的对错。唯一可以确定的就是，不管使用何种描述语言，甜菜夜蛾在当地当年发生的种群数量或危害量已经达到了当地生产者在理念上不可容忍的程度，这是人们认可为“暴发年”的最直观的感性标准，我们没有理由否定。现将各地区和各作者描述甜菜夜蛾暴发年状况的各类术语和量化指标归类于表 2，供读者参考。

1.1.2 暴发指数及轻重程度相对分级：本文所做的逐步回归分析结果表明(见 2.1 ~ 2.5 节分析结

果)，甜菜夜蛾暴发年频次 $y_i + 1$ 的对数值 $\ln(y_i + 1)$ [为方便下文描述，此处特定义 $\ln(y_i + 1)$ 为甜菜夜蛾暴发趋势指数，并记为 I_i ，即 $I_i = \ln(y_i + 1)$ ，下同] 与我国 27 城市气象台记录的广域平均温度及广域降雨量有着显著而复杂的线性回归关系，且以其为自变量(x_i)建立的多元线性回归模型能很好地模拟和预测甜菜夜蛾暴发趋势指数 I_i 值。为了更直观地表达甜菜夜蛾暴发趋势指数 I_i 值的大小所表达的甜菜夜蛾发生轻重程度信息，我们以表 1 中

表 2 各地区和各作者描述甜菜夜蛾暴发年状况的各类术语和量化指标及使用举例

Table 2 Terms and indexes used for describing the outbreak of the beet armyworm and application examples

序号 No.	术语/指标 Terms/indexes	综合量值范围 Range	使用举例 Application examples				
			当年量值范围 Yearly range	爆发年度 Year	爆发地区 Region	被害作物 Crop	参考文献 References
1	幼虫数/百棵(作物) Larvae/100 crops	20 – 40 000	1 000 – 5 000	1958	山东聊城 Liaocheng, Shandong	小麦 Wheat	陈克健, 1966
2	卵块数/百棵(作物) Eggs/100 crops	5 – 134	44	1997	河南三门峡 Sanmenxia, Henan	棉花 Cotton	索世虎等, 2005
3	成虫数/诱虫灯/天 (Adults/lamp/d)	100 – 3 380	270 – 420	2003	上海郊区 Shanghai suburb	大葱 Scallion	朱佩瑾, 2004
4	成虫数/诱芯盆/天 Adults/trap/d	38 – 1 225	1 225	2007	江苏阜宁 Funing, Jiangsu	棉花 Cotton	程玉家等, 2008
5	幼虫数/666 m ² Larvae/666 m ²	15 000 – 125 000	56 000 – 125 000	1997	浙江嘉兴 Jiaxing, Zhejiang	棉花 Cotton	钱长根, 1999
6	作物被害棵率(%) Rate of damaged plants	20 – 100	30 – 60	2003	安徽全椒 Quanjiao, Anhui	菊花 Chrysanthemum	孙军和刘轩 武, 2006
7	作物被害叶率(%) Rate of damaged leaves	40 – 100	45 – 98	1999	山东莱西 Laixi, Shandong	白菜 Cabbage	丁永青和葛宝 明, 2001
8	作物被害面积(666m ²) Area of damaged crops	10 000 – 600 000	45 000	2000	江西新余 Xinyu, Jiangxi	棉花 Cotton	陈凤英, 2004
9	减产率(%) Rate of crop loss	10 – 80	10 – 50	2006	江苏东台 Dongtai, Jiangsu	辣椒 Pimiento	丁志宽等, 2007
10	减产量(kg/hm ²) Amount of crop loss	300 – 375	300 – 375	2003	河南舞钢 Wugang, Henan	棉花 Cotton	曹春田等, 2005
11	减产值(¥/hm ²) Value of crop loss	28 200 000 – 300 000 000	300 000 000	2001	浙江温州 Wenzhou, Zhejiang	蔬菜 Vegetables	任兰花等, 2005
12	非数值型文字术语 Non-numeric terms	大面积暴发成灾 Large area disaster	大面积暴发 Large area disaster	2007	陕西华阴 Huayin, Shaanxi	大葱 Scallion	冯小红, 2009
		大爆发 Large outbreak	大爆发 Large outbreak	2001	河南驻马店 Zhumadian, Henan	蔬菜 Vegetables	王合松等, 2004
		大发生 Large occurrence	大发生 Large occurrence	1999	河南灵宝 Lingbao, Henan	棉花 Cotton	薛敏生等, 2008
		重发年 Severe occurrence	重发年 Severe occurrence	1992	上海郊区 Shanghai suburb	蔬菜 Vegetables	赵建周和吴世 昌, 1995

I_i 为依据，按每 0.5 个指数点晋级制，将甜菜夜蛾 值大小分级（表 3）。
在我国广域发生的总体轻重程度按本文所定义的 I_i

表 3 我国甜菜夜蛾广域暴发程度的相对分级标准
Table 3 The relative grading standard of wide area outbreak degree of the beet armyworm in China

轻重程度分级值 Grading value	按 I_i 值大小的分级标准 Grading standard based on I_i value	
	趋势指数 I_i 值范围 Range of I_i	轻重程度 Severity degree
0	<0.50	轻发生年 Light
1	0.50 – 1.00	中等偏轻发生年 Moderate to light
2	1.01 – 1.50	中等发生年 Moderate
3	1.51 – 2.00	中等偏重发生年 Moderate to heavy
4	2.01 – 2.50	重度发生年 Heavy
5	>2.50	特大发生年 Very heavy

I_i = 暴发趋势指数 = $\ln(\text{暴发年频次 } y_i + 1)$ 。 I_i = Outbreak trend index = $\ln(\text{year frequency } y_i + 1)$ 。

1.2 关于我国广域温度和广域降雨量综合值的获取

本文所用的温度和降雨量资料，是中国气象中心发布的实际观测数据，本系列数据为 18 年（1991 – 2008）的月平均值（表 1）。在方法上，通过对 27 个省市级城市气象台（北京密云、重庆江津、福建福州、安徽合肥、广西南宁、贵州贵阳、海南海口、黑龙江哈尔滨、河南郑州、湖北武汉、湖南长沙、内蒙古呼和浩特、江西南昌、吉林长春、宁夏银川、青海西宁、陕西西安、山东济南、上海、山西太原、天津、西藏拉萨、新疆乌鲁木齐、云南昆明、浙江杭州、广州中山和江苏苏州）18 年的温度和降雨量序列与对应的我国甜菜夜蛾暴发“年频次”值进行趋势比较分析（王燕，2005；武文华等，2007）和相关-回归-方差分析（张文彤，2002），以发现在广域温度和广域降雨量按时间序列变化的背景下，我国甜菜夜蛾暴发“年频次”值的时间序列变化趋势及其与我国广域平均温度和平均降雨量时间序列变化趋势的关联方向（正负）和关联程度（大小）。值得指出的是，27 个省市级气象台平均温度和平均降雨量相当于在全国范围内抽样 27 个样点代表全国性广域平均温度和广域平均降雨量，它与甜菜夜蛾暴发“年频次”年度是对应的，但与甜菜夜蛾暴发地区没有直接关系，更没有对应关系。

1.3 资料处理

长期趋势，多因素分析采用多元线性回归，筛选变量时采用逐步回归法，数据的统计分析采用 SPSS11.5 软件（张文彤，2002），图表采用 Microsoft Excel 和 Microsoft Word 等软件。

2 结果与分析

2.1 我国甜菜夜蛾暴发“年频次”变化的长期趋势

长期趋势意味着害虫发生量随时间的推移而逐

渐变动，它反映一定时期内害虫种群活动持续存在的稳定性。经对我国 1979 – 2008 年甜菜夜蛾暴发指数 I_i 值进行长期趋势线性模型拟合，表明下列模型为甜菜夜蛾暴发指数 I_i 值的长期趋势模型（图 1），

即： $I_i = 0.0081 + 0.0760t \pm 0.6423$ (1)

($F = 31.76^{**}$, $P = 0.000$, $r^2 = 0.529^{**}$, $P = 0.002$)

式(1)中： I_i 为第 t 年的暴发指数， t 为时间 [年]，且 $1 \leq t \leq 30$ 。

模型(1)和图 1 提示，我国甜菜夜蛾暴发指数在 1979 – 2008 年间，虽然年与年之间差异很大，即呈现出不规则的波浪型发展趋势，但其总趋势呈上升型发展，即甜菜夜蛾暴发指数平均年递增率为 0.076 [取模型(1) $I = 0.0081 + 0.0760t \pm 0.6423$ 中的回归系数 0.076]。

2.2 我国广域温度变化的长期趋势

本文计算的我国 27 个城市气象台记录的总年平均温度值（表 1）表明，最近 20 年来，年平均温度最高 14.62℃，最低 13.25℃，总平均 13.96℃，极差为 1.37℃（14.62 ~ 13.25），进一步分析表明，我国广域温度变化总的特点是呈上升趋势（图 2），其趋势模型为以时间年序列为自变量的线性回归模型：

$T = 13.566 + 0.039t$ ($r = 0.597^{**}$, $P = 0.007$) (2)

式(2)中， T 为第 t 年的平均温度℃， t 为时间“年”序列， $1 \leq t \leq 20$ ，模型显著水准为 $P = 0.007$ ，达极显著水平。

模型(2)和图 2 提示，我国广域温度（以 27 个城市为例）在 1990 – 2008 年 19 年间，在以平均每年 0.039℃的速率上升，这与全球气候变暖，即在过去 100 多年中，全球平均气温约上升 0.3 ~ 0.6℃

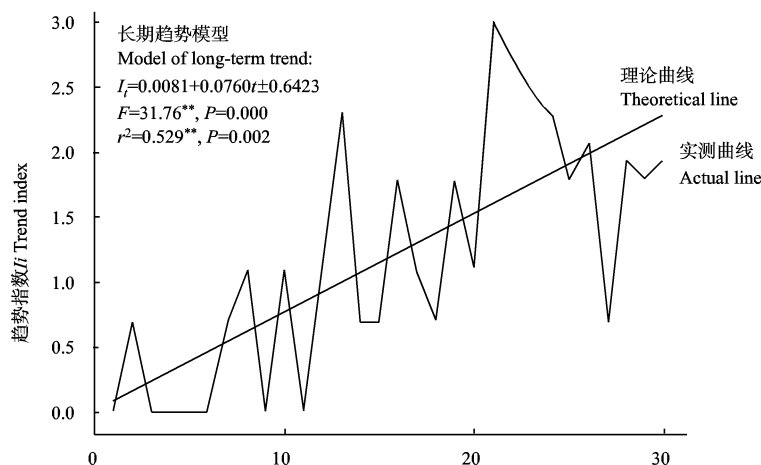
图1 1979–2008 我国甜菜夜蛾暴发指数 I_i 值的长期趋势图

Fig. 1 Chart of outbreak trend index of *Spodoptera exigua* (I_i) between 1979 and 2008 in China
时间年序列 Annual time series; 0 = 1978; 10 = 1988; 20 = 1998; 30 = 2008.

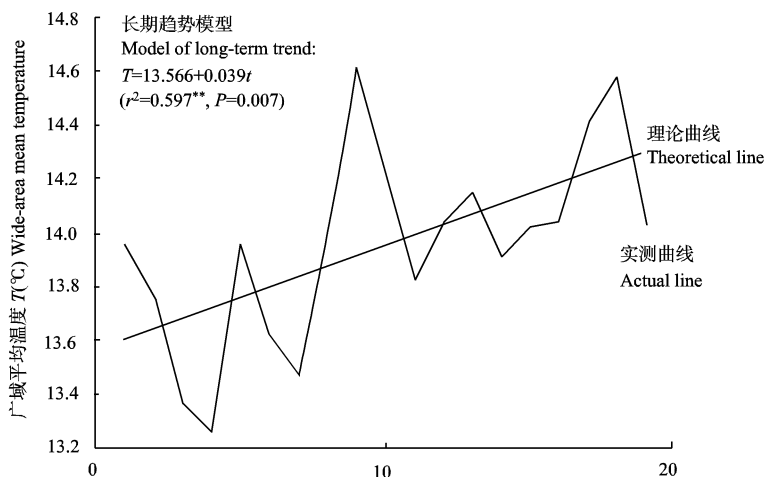


图2 我国1991–2008 年各年度广域平均温度变化趋势图

Fig. 2 Chart of variation trend of wide area mean temperature between 1991 and 2008 in China
时间年序列 Annual time series; 0 = 1989; 10 = 1999; 20 = 2009.

(丁裕国等, 2001a, 2001b), 20 世纪 80 年代是这一温度序列中最暖的 10 年(赵宗慈等, 2005)的现象相吻合。有趣的是, 在各年度中, 发生温度上升趋势显著的月份主要是 3 月 ($T = 7.6287 + 0.0894t$, 显著水准 $P = 0.034$) 和 10 月 ($T = 14.2132 + 0.0790t$, 显著水准 $P = 0.028$), 而其余月份在年时间序列中未见有显著的上升趋势(为节省篇幅, 图略)。

为了进一步分析广域温度升高是否为甜菜夜蛾暴发频度上升的原因之一, 并探索广域温度变化动态模式是否真正影响甜菜夜蛾的暴发程度, 现利用相关回归分析和时间序列分析原理进一步剖析我国广域温度和广域降雨量变化趋势对甜菜夜蛾暴发频度的影响规律。

2.3 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域降雨量的逐步回归分析

以表 1 中 1991–2008 年甜菜夜蛾暴发指数 I_i 为因变量 y_i , 1990–2008 年 1–12 月及总年均降雨量 x_i 值为自变量(为节省篇幅, 相关降雨量统计表略), 进行滞后或同年一元或多元、直线或曲线逐步回归分析, 结果表明, 甜菜夜蛾暴发指数 y_i 值与当年 3 月总降雨量呈显著的负相关, 而与上年 1 月和 8 月的月总降雨量呈显著的正相关(见公式 3)。

$$y = -1.437 + 0.065x_1 - 0.023x_2 + 0.017x_3 \pm 0.426 \quad (3)$$

(复相关系数 $R = 0.855^{**}$; 决定系数 $R^2 = 0.732^{**}$; 回归方程的显著性检验值 $F = 11.82^{**}$; y

- 甜菜夜蛾暴发指数估计值，其余变量见表 4)

统计分析 (F 和 t 检验) 结果表明 (表 4)，式 (3) 回归模型方程 y 和各回归系数 b_i 均达到显著级 ($P < 0.05$) 或极显著级 ($P < 0.01$) 水平。

2.4 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域平均温度的逐步回归分析

在表 1 中，令 1991 - 2008 年甜菜夜蛾暴发指数 I_i 为因变量 y_i ，1990 - 2008 年 1 - 12 月及总年均

温度 x_{ij} 值为自变量，进行滞后或同年一元或多元、直线或曲线逐步回归分析，结果表明，甜菜夜蛾暴发指数 I_i 值与当年 1, 3, 7 月以及上年 9 和 10 月和上年全年总平均温度值间存在着多种形式的线性回归关系 (表 5)，且这些关系的共同特点是，全部回归系数为正值，而无一负值，这可进一步证明，上年和当年广域长时期大气温度越高，甜菜夜蛾大尺度暴发的可能性越大。

表 4 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域降雨量关系的逐步回归分析结果表
Table 4 Result of stepwise regression analysis of relationship of *Spodoptera exigua* outbreak index with the wide-area rainfall in China

模型 (3) 中各变量的意义 Significance of each variable in Model (3)	回归系数 Regression coefficient (b_i)	标准误 Standard error (SE)	t 检验值 t test	显著性检验 P 值 Test of significance (P)	回归系数 b_i 的 95% 可信区间 Confidence interval for b_i
常数项 Constant term	$b_0 = -1.437$	1.104	-1.301	0.216	-3.822 - 0.949
x_1 , 上年度 1 月广域月均总降雨量 (mm) Rainfall of Jan. of last year	$b_1 = 0.065$	0.014	4.532	0.001 **	0.034 - 0.096
x_2 , 当年 3 月广域月均总降雨量 (mm) Rainfall of Mar. of current year	$b_2 = -0.023$	0.007	-3.185	0.007 **	-0.039 - -0.008
x_3 , 上年度 8 月广域月均总降雨量 (mm) Rainfall of Aug. of last year	$b_3 = 0.017$	0.006	2.854	0.014 *	0.004 - 0.030

* 在 0.05 水平上显著 Significant difference at the 0.05 level; ** 在 0.01 水平上显著 Significant difference at the 0.01 level. 表 6 同 The same for Table 6.

表 5 我国甜菜夜蛾暴发趋势指数与广域温度关系的回归分析结果表
Table 5 Result of stepwise regression analysis of relationship of *Spodoptera exigua* outbreak index with the wide-area temperature in China

模型 编号 No.	暴发指数回归模型 (I_i 预测值的表达式) Regression model	标准误 error (SE)	复相关系数 Multiple correlation coefficient (R)	决定系数 Determination coefficient (R^2)	模型显著 检验 F Test	显著检验 P 值 Test of significance (P)	线性回归模型中 x_i (自变量) 意义及模型预测的 适用范围 Significance of each variable in models and scope of application of each model
1	$I_1 = 0.744x - 13.668$ ± 0.513	0.513	0.742 **	0.521	18.375 **	0.001	x = 上年 9 月日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$) Temperature of last Sep.
2	$I_2 = 0.866x - 13.72$ ± 0.491	0.491	0.767 **	0.589	21.454 **	0.000	x = 上年 9、10 月总日平均温度 Temperature of last Sep. and Oct. (适用于年前预测下年 Forecast next year)
3	$I_3 = 0.657x_1 + 0.272x_2$ $- 15.925 \pm 0.466$	0.466	0.809 **	0.654	13.242 **	0.000	x_1 = 上年 9 月日平均温度 Temperature of last Sep.; x_2 = 上年 10 月日平均温度 Temperature of last Oct. (适用于年前预测下年 Forecast next year)
4	$I_4 = 1.044x - 15.546$ ± 0.506	0.506	0.749 **	0.562	19.22 **	0.000	x = 上年 9、10 月及全年总日平均温度 Temperature of last Sep., Oct. and full year (适用于 年初预测当年 Forecast beginning of a year)
5	$I_5 = 0.6x - 0.94$ ± 0.597	0.597	0.614 **	0.377	9.974 **	0.007	x = 当年 1、3 月总日平均温度 Temperature of Jan., and Mar. of this year. (适用于年初预测当 年 Forecast this year)
6	$I_6 = 0.904x - 8.684$ ± 0.554	0.554	0.680 **	0.463	13.77 **	0.002	x = 当年 1、3 及 7 月总日平均温度 Temperature of Jan., Mar. and Jul. of this year. (适用于夏末 预测秋季 Forecast autumn of this year)
7	$I_7 = 0.522x_1 + 0.553x_2$ $- 15.434 \pm 0.447$	0.447	0.825 **	0.681	14.96 **	0.000	x_1 = 上年 9 月日平均温度 Temperature of last Sep.; x_2 = 当年 1、3 及 7 月总日平均温度 Temperature of Jan., Mar. and Jul. of this year. (适用于夏末预测秋季及全年 Forecast autumn and full year of this year)

** 相关或回归系数在 $P < 0.01$ 水平上显著 Correlation or regression coefficients are significantly different at the 0.01 level.

统计分析(F 检验)结果表明(表 5), 各个回归模型(表 5 左起第 2 列), 都具有显著的适合性, 即所有方程的 F 值都在极显著级($P \leq 0.01$)水平, 可见, 全国广域大气温度对甜菜夜蛾大尺度暴发程度的定量影响是稳定的和可信的。

2.5 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域平均温度及平均降雨量的综合回归分析

在表 1 中, 令 1992–2008 年甜菜夜蛾暴发指数 I_i 为因变量 y_i , 并取当年及上年 1–12 月温度值和降雨量值或其组合值(x_i)的标准化值(z_i)为自变量($z_i = [x_i - x_{mi}]/x_{sdi}$)综合进行滞后或同年一元或多元、直线或曲线逐步回归分析, 结果表明, 甜菜夜蛾暴发指数 y_i 值与上年 9 月和当年 1, 3, 7 月总日均温($^{\circ}\text{C}$) z_1 、 z_2 , 以及上年 4, 5, 9, 10, 12 月和当年 3, 4, 6 月各月降雨量 z_3 , z_4 , z_5 , z_6 , z_7 , z_8 , z_9 和 z_{10} 呈显著的多元线性回归关系, 即

$$\hat{y} = 1.68 + 0.28z_1 + 0.27z_2 + 0.42z_3 + 0.05z_4 - 0.06z_5 + 0.18z_6 - 0.35z_7 - 0.21z_8 + 0.18z_9 + 0.13z_{10} \pm 0.501 \quad (4-1)$$

(复相关系数 $R = 0.999^{**}$; 决定系数 $R^2 = 0.998^{**}$; 回归模型的显著性检验值 $F = 340.9^{**}$; $\hat{y}$ 为甜菜夜蛾暴发指数估计值, 其余变量见表 6)

进一步统计分析(t 检验)结果表明, 回归模型

(4) 方程中各回归系数 b_i 均达到显著级($P < 0.05$)或极显著级($P < 0.01$)水平(表 6)。

因为式(4)中 z_i 为各实测自变量 x_i 的标准化值, 即 $z_i = (x_i - x_{mi})/x_{sdi}$ (其中 x_{mi} 和 x_{sdi} 分别为用来建模的 x_i 列自变量的平均数和标准差, 列于表 6), 所以将 $z_i = (x_i - x_{mi})/x_{sdi}$ 代入式(4-1), 即得

$$\hat{y} = 1.68 + 0.28(x_1 - x_{m1})/x_{sd1} + 0.27(x_2 - x_{m2})/x_{sd2} + 0.42(x_3 - x_{m3})/x_{sd3} + 0.05(x_4 - x_{m4})/x_{sd4} - 0.06(x_5 - x_{m5})/x_{sd5} + 0.18(x_6 - x_{m6})/x_{sd6} - 0.35(x_7 - x_{m7})/x_{sd7} - 0.21(x_8 - x_{m8})/x_{sd8} + 0.18(x_9 - x_{m9})/x_{sd9} + 0.13(x_{10} - x_{m10})/x_{sd10} \pm 0.501 \quad (4-2)$$

因为模型(4-2)中 x_i 为自变量实测值, 而 x_{mi} 和 x_{sdi} 均为已知常数(可从表 6 中查得), 所以, 应用模型(4-3), 可直接输入对应年份的自变量温度($^{\circ}\text{C}$)或降雨量(mm)实测值计算出对应的甜菜夜蛾暴发指数 y 的估计值 $\hat{y}$ 。

$$\hat{y} = 1.68 + 0.28(x_1 - 20.62)/0.74 + 0.27(x_2 - 11.50)/0.57 + 0.42(x_3 - 64.81)/9.57 + 0.05x_4 - 99.40/15.30 - 0.06(x_5 - 82.20)/11.51 + 0.18(x_6 - 50.90)/15.83 - 0.35(x_7 - 22.15)/10.22 - 0.21(x_8 - 47.06)/14.89 + 0.18(x_9 - 64.73)/9.57 + 0.13(x_{10} - 132.27)/16.31 \quad (4-3)$$

表 6 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域温度和降雨量关系的逐步回归分析结果表

Table 6 Results of the stepwise regression analysis of relationship of *Spodoptera exigua* outbreak index with the wide-area temperature and rainfall in China

自变量 Independent variable x_i	x_i 自变量 平均值 Mean of x_i (x_{mi})	x_i 自变量 标准差 Standard deviation of x_i (x_{sdi})	回归系数 Regression coefficient (b_i)	标准误 Standard error (SE)	t 检验值 t test	显著性检测值 Test of significance (P)	回归系数 b_i 的 95% 可信区间 Confidence interval for b_i	
							下限 Lower	上限 Upper
x_0			1.68	0.012	136.80 ^{**}	0.000	1.652	1.712
x_1	20.62	0.74	0.28	0.022	12.50 ^{**}	0.000	0.228	0.336
x_2	11.50	0.57	0.27	0.025	10.79 ^{**}	0.000	0.209	0.331
x_3	64.81	9.57	0.42	0.019	22.02 ^{**}	0.000	0.374	0.467
x_4	99.40	15.30	0.05	0.018	2.70 [*]	0.036	0.005	0.094
x_5	82.20	11.51	-0.06	0.017	-3.31 [*]	0.016	-0.098	-0.015
x_6	50.90	15.83	0.18	0.016	11.25 ^{**}	0.000	0.142	0.220
x_7	22.15	10.22	-0.35	0.019	-18.67 ^{**}	0.000	-0.394	-0.302
x_8	47.06	14.89	-0.21	0.015	-13.42 ^{**}	0.000	-0.244	-0.169
x_9	64.73	9.57	0.18	0.019	9.12 ^{**}	0.000	0.128	0.221
x_{10}	132.27	16.31	0.13	0.019	6.93 ^{**}	0.000	0.084	0.176

x_i : 模型(4-2)中第 i 个变量($x_i = \text{The variable } x_i \text{ in Model (4-2)}$); x_0 : 常数项(Constant term); x_1 : 上年 9 月日均温($^{\circ}\text{C}$) (Mean temperature of Sep. of last year); x_2 : 当年 1, 3, 7 月总日均温($^{\circ}\text{C}$) (Mean temperature of Jan., Mar. and Jul. of current year); x_3 : 上年 4 月总降雨量(mm) (Rainfall of Apr. of last year); x_4 : 上年 5 月总降雨量(mm) (Rainfall of May of last year); x_5 : 上年 9 月总降雨量(mm) (Rainfall of Sep. of last year); x_6 : 上年 10 月总降雨量(mm) (Rainfall of Oct. of last year); x_7 : 上年 12 月总降雨量(mm) (Rainfall of Dec. of last year); x_8 : 当年 3 月总降雨量(mm) (Rainfall of Mar. of current year); x_9 : 当年 4 月总降雨量(mm) (Rainfall of Apr. of current year); x_{10} : 当年 6 月总降雨量(mm) (Rainfall of Jun. of current year); 表 7~9 同。The same for Tables 7–9.

2.6 回归模型的应用

2.6.1 用回归模型回检甜菜夜蛾历史数据检验历史符合率：以模型(4-3) (平均温度和平均降雨量的综合回归模型)为例，将 1992 – 2008 年我国 27 个城市相关温度值和降雨量值作为自变量分别代入上述模型(4-3)中，回代 1992 – 2008 年甜菜夜蛾在我国广域发生的总体轻重程度(暴发指数)，直观结果明显，模型模拟值(表 7 中 $\hat{y}$ 列)与实测值(表 7 中

y 列)几乎完全一致，实测值(表 7 中 y)和预测值(表 7 中 $\hat{y}$)之间的 χ^2 总和仅为 0.0987，即 $\sum \chi^2 = \sum (y - \hat{y})^2 / \hat{y} = 0.01 < \chi^2_{0.995(15)} = 4.60$ ，而其实测分级值(表 8 中 yd)和预测分级值(表 8 中 $\hat{y}d$)之间的 χ^2 总和为 0，即 $\sum \chi^2 = \sum (yd - \hat{y}d)^2 / \hat{y}d = 0 < \chi^2_{0.995(15)} = 4.60$ ，所以，回归模型的预测准确度达 99% 以上，特别是其历史符合率达 100%。可见模型(4)的模拟能力已达至极高水平。

表 7 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域温度及广域降雨量回归模型回检结果的 χ^2 适合性检验
Table 7 Simulation results of the regression model of relationship of *Spodoptera exigua* outbreak index with the wide-area temperature and rainfall in China

年份 Year	y	$\hat{y}$	yd	$\hat{y}d$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
1992	0.69	0.69	1	1	20.64	10.96	65.65	96.41	90.53	48.97	21.92	90.04	59.97	129.83
1993	0.69	0.66	1	1	20.19	10.54	59.97	111.30	76.16	40.58	23.15	48.88	60.12	133.17
1994	1.79	1.74	3	3	20.36	11.24	60.12	91.25	99.20	53.34	16.02	41.93	74.09	146.80
1995	1.10	1.08	2	2	20.09	11.33	74.09	89.28	92.23	46.69	38.76	41.71	59.35	131.92
1996	0.69	0.70	1	1	18.97	10.77	59.35	97.04	67.77	71.88	12.65	66.52	56.76	135.51
1997	1.79	1.83	3	3	21.09	11.97	56.76	75.18	82.42	48.55	15.69	44.66	70.87	112.08
1998	1.10	1.11	2	2	19.42	11.39	70.87	91.98	80.46	41.05	29.09	61.04	76.95	132.91
1999	3.00	3.02	5	5	21.72	11.69	76.95	122.90	75.92	51.88	17.68	50.38	70.33	128.30
2000	2.71	2.64	5	5	21.70	11.54	70.33	113.66	84.29	70.28	15.12	37.91	55.09	113.04
2001	2.48	2.50	4	4	20.91	12.01	55.09	79.68	79.40	83.03	15.61	36.26	63.19	161.47
2002	2.30	2.27	4	4	20.98	12.90	63.19	83.70	68.08	53.04	41.24	49.95	87.05	143.66
2003	1.79	1.84	3	3	20.32	11.30	87.05	111.98	72.75	52.96	44.32	43.97	68.06	123.47
2004	2.08	2.09	4	4	20.75	11.43	68.06	99.76	93.91	40.38	14.45	32.83	64.83	128.39
2005	0.69	0.70	1	1	20.53	10.92	64.83	112.07	76.36	14.34	24.28	33.81	47.93	115.84
2006	1.95	1.97	3	3	21.64	11.95	47.93	126.31	105.39	51.38	15.59	30.00	67.95	124.40
2007	1.79	1.77	3	3	20.44	11.99	67.95	105.45	64.14	33.41	13.03	53.83	53.59	115.99
2008	1.95	1.97	3	3	20.77	11.64	53.59	81.86	88.34	63.60	17.90	36.29	64.24	171.79
$\sum \chi^2$	0.01		0		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

y 和 $\hat{y}$ 分别为甜菜夜蛾暴发指数实测值和模拟值； yd 和 $\hat{y}d$ 分别为甜菜夜蛾暴发指数实测分级值和模拟分级值。 y = actual index of *Spodoptera exigua* outbreak, and $\hat{y}$ = simulation index; yd = actual grading value of *S. exigua* outbreak index, and $\hat{y}d$ = simulation grading value.

2.6.2 用于预测广域甜菜夜蛾种群暴发指数(或分级值)的发生总趋势：表 7 结果虽然已表明回归预测模型(4)的历史符合率达到 100%，但作为模型的实际应用，更重要的是要在通过回检的基础上做出合理的预测检验。一般认为，用于预测的年份，其资料不能参加建模，换言之，被预测年份的自变量资料应与用来做预测的回归模型中的参数(回归系数)来源无关，只有这样，才能检验模型是

否具有真正独立的预测功能。
为了进一步检验模型(4)是否有真正的独立预测功能，此处采用去除部分历史资料法用模型(4)中同类自变量进行重新建模，以检验新模型对未参加建模年份的暴发指数(或级值)的预测准确性。模型(4)建模时采用的是 1992 – 2008 年的历史资料。现分别采用 1995 – 2008 年(去除前 3 年 1992 – 1994 年资料)和 1992 – 2005 年(去除后 3 年 2006

-2008 年资料)历史资料分别重建新模型(5)和新模型(6),以分别检验对 1992-1994 年和 2006-2008 年各年度甜菜夜蛾暴发指数(或级值)的预测准确性。新建模型如下:

$$\text{模型(5): } \hat{y}_{(1995-2008)} = 1.816 + 0.319z_1 + 0.275z_2 + 0.462z_3 - 0.050z_4 - 0.041z_5 + 0.199z_6 - 0.368z_7 - 0.125z_8 + 0.152z_9 + 0.141z_{10} \pm 0.047 \quad (5-1)$$

将 $z_i = (x_i - x_{mi})/x_{sdi}$ 代入式(5-1), 即得

$$\hat{y}_{(1995-2008)} = 1.816 + 0.319(x_1 - 20.67)/0.81 + 0.275(x_2 - 11.63)/0.53 + 0.462(x_3 - 65.43)/10.43 - 0.050(x_4 - 99.35)/16.47 - 0.041(x_5 - 80.82)/11.43 + 0.199(x_6 - 51.61)/17.29 - 0.368(x_7 - 22.53)/11.20 - 0.125(x_8 - 44.23)/10.94 + 0.152(x_9 - 64.73)/10.12 + 0.141(x_{10} - 131.34)/17.60 \pm 0.047 \quad (5-2)$$

(复相关系数 $R = 0.999^{**}$; 决定系数 $R^2 = 0.996^{**}$; 回归方程的显著性检验值 $F = 292.2^{**}$; $\hat{y}$ 为甜菜夜蛾暴发指数估计值, 其余变量同表 6)

$$\text{模型(6): } \hat{y}_{(1992-2006)} = 1.657 + 0.236z_1 + 0.334z_2 + 0.313z_3 - 0.145z_4 - 0.010z_5 + 0.216z_6 - 0.308z_7 - 0.208z_8 + 0.178z_9 + 0.102z_{10} \pm 0.013 \quad (6-1)$$

将 $z_i = (x_i - x_{mi})/x_{sdi}$ 代入式(5-1), 即得

$$\hat{y}_{(1992-2006)} = 1.657 + 0.236(x_1 - 20.56)/0.74 + 0.334(x_2 - 11.44)/0.57 + 0.313(x_3 - 65.73)/9.09 - 0.145(x_4 - 97.20)/14.42 - 0.010(x_5 - 81.85)/9.47 + 0.216(x_6 - 52.04)/16.22 - 0.308(x_7 - 23.19)/10.45 - 0.208(x_8 - 47.75)/15.12 + 0.178(x_9 - 65.26)/9.73 + 0.102(x_{10} - 133.88)/16.67 \pm 0.013 \quad (6-2)$$

(复相关系数 $R = 1^{**}$; 决定系数 $R^2 = 1^{**}$; 回归方程的显著性检验值 $F = 5394.04^{**}$; $\hat{y}$ 为甜菜夜蛾暴发指数估计值, 其余变量同表 6)。

现将表 7 中 1992-1994 和 2006-2008 各年度 z_i 和 x_i 值分别代入模型(5)和模型(6)中计算出各年度的甜菜夜蛾暴发指数(或级值)的预测值(表 8)。经 χ^2 适合性检验结果可知, 甜菜夜蛾暴发指数实测值(表 8 中 y)和预测值(表 8 中 $\hat{y}$)之间的 χ^2 总和为 0.13, 即 $\sum \chi^2 = \sum (y - \hat{y})^2 / \hat{y} = 0.14 < \chi_{0.995(4)}^2 = 0.21$, 而其实测分级值(表 8 中 yd)和预测分级值(表 8 中 $\hat{y}d$)之间的 χ^2 总和为 0.25, 即 $\sum \chi^2 = \sum (yd - \hat{y}d)^2 / \hat{y}d = 0.25 < \chi_{0.990(4)}^2 = 0.80$, 所以, 回归模型的预测准确度达 99% 以上。

表 8 我国甜菜夜蛾暴发指数与广域温度及广域降雨量回归模型的预测检验结果

Table 8 Forecast test results of the regression model of relationship of *Spodoptera exigua* outbreak index with the wide-area temperature and rainfall in China

年份 Year	y	$\hat{y}$	yd	$\hat{y}d$	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
1992	0.69	0.82	1	1	20.64	10.96	65.65	96.41	90.53	48.97	21.92	90.04	59.97	129.83
1993	0.69	0.54	1	1	20.19	10.54	59.97	111.30	76.16	40.58	23.15	48.88	60.12	133.17
1994	1.79	1.74	3	3	20.36	11.24	60.12	91.25	99.20	53.34	16.02	41.93	74.09	146.80
2006	1.95	1.82	3	4	21.64	11.95	47.93	126.31	105.39	51.38	15.59	30.00	67.95	124.40
2007	1.79	1.60	3	3	20.44	11.99	67.95	105.45	64.14	33.41	13.03	53.83	53.59	115.99
2008	1.95	2.25	3	4	20.77	11.64	53.59	81.86	88.34	63.60	17.90	36.29	64.24	171.79
$\Sigma \chi^2$	0.140		0.250		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

y 和 $\hat{y}$ 分别为甜菜夜蛾暴发指数实测值和预测值; yd 和 $\hat{y}d$ 分别为甜菜夜蛾暴发指数实测分级值和预测分级值。 y = actual index of *Spodoptera exigua* outbreak, and $\hat{y}$ = forecast index; yd = actual grading value of *S. exigua* outbreak index, and $\hat{y}d$ = forecast grading value.

2.6.3 用于局部地区不同年份甜菜夜蛾种群暴发指数(或级值)发生趋势的预测: 我国幅员辽阔, 各地温度、降雨量分布极不均匀, 所以在上述模型(4-2)中自变量 x_i 的总体均数 x_{mi} 和总体标准差 x_{sdi} 在我国南北或东西不同地区有较大差异, 因此, 不宜直接应用模型(4-3)预测或比较不同局部地区的甜菜夜蛾发生量趋势指数。

然而, 我们仍可通过计算其预测地区本地的自变量历史资料(温度与降雨量) x_i 的总体均数 x_{mi} 和总体标准差 x_{sdi} , 然后将之代入模型(4-2)中, 得出适合于当地的标准化新模型。

现以浙江杭州 1992-2008 年各年度相关温度值和降雨量值为例, 在表 9 中, 先计算出 x_1 至 x_{10} 各列 1992-2008 的平均值 x_{mi} 和标准差 x_{sdi} (分别

列于表 9 最后两行)，然后将其代入模型(4-2)中，即可得出适合杭州地区的甜菜夜蛾暴发指数趋势预测模型，即

$$\hat{y}_{\text{杭州}} = 1.68 + 0.28(x_1 - 24.21)/0.76 + 0.21(x_2 - 14.88)/0.96 + 0.42(x_3 - 168.11)/12.61 + 0.05(x_4 - 216.16)/12.51 - 0.06(x_5 - 242.07)/7.63 + 0.18(x_6 - 191.18)/10.78 - 0.35(x_7 - 73.44)/10.26 - 0.21(x_8 - 108.44)/15.00 + 0.16(x_9 - 168.53)/12.75 + 0.13(x_{10} - 249.87)/12.04 \pm 0.051 \quad (7)$$

应用模型(7)预测杭州地区 1992 - 2009 各年

度甜菜夜蛾暴发趋势指数及其分级值列于表 9 最右两列。如令暴发指数 1 ~ 2 级为轻发年，3 级为中发年，4 ~ 5 级为重发年，则杭州地区在 1992 - 2008 年的 17 年间甜菜夜蛾发生情况是，有 7 个轻发年，5 个中发年和 5 个重发年。有趣的是，据所查文献报道，浙江省杭州及其周边地区 2000，2004，2005，2006 年正为甜菜夜蛾大发生年，与表 9 中预测结果(2000，2004，2005，2006 年依次为 4，4，4，5 级)十分吻合。可见，温度和降雨量的综合作用不仅定量地影响广域地区甜菜夜蛾的总体发生趋势，也明显地影响局部地区的发生趋势。

表 9 应用模型(4-2)和当地历年温度及降雨量预测浙江杭州 1991 - 2008 年甜菜夜蛾的暴发程度
Table 9 Forecast results of *Spodoptera exigua* outbreak level of Hangzhou, Zhejiang between 1991 and 2008 by application of the model (4-3) and the local temperature and rainfall

年份 Year	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	$\hat{y}$	$\hat{y}d$
1992	23.70	13.73	168.53	205.00	237.00	180.00	68.00	86.00	167.00	233.00	1.36	2
1993	23.80	13.17	167.00	206.00	238.00	171.00	80.00	98.00	159.00	251.00	0.58	1
1994	23.70	14.99	159.00	196.00	237.00	178.00	60.00	92.00	168.00	249.00	1.62	3
1995	23.90	14.87	168.00	236.00	239.00	183.00	87.00	111.00	148.00	229.00	0.52	1
1996	24.90	13.43	148.00	204.00	249.00	187.00	61.00	84.00	141.00	255.00	1.22	2
1997	24.80	14.57	141.00	208.00	248.00	192.00	76.00	115.00	164.00	253.00	0.66	1
1998	22.80	14.86	164.00	232.00	228.00	192.00	73.00	101.00	192.00	244.00	1.57	3
1999	23.50	14.10	192.00	216.83	235.00	202.00	86.00	100.00	163.00	227.00	1.65	3
2000	25.70	14.97	163.00	214.00	257.00	194.00	69.00	112.00	171.00	253.00	2.18	4
2001	24.30	16.23	171.00	227.00	243.00	191.00	87.00	123.00	161.00	244.00	1.31	2
2002	24.10	16.27	161.00	219.00	241.00	196.00	66.00	136.00	171.00	261.00	1.83	3
2003	24.00	14.61	171.00	201.00	240.00	188.00	68.00	106.00	168.53	249.00	1.75	3
2004	24.28	15.00	168.53	210.00	242.75	191.18	63.00	103.00	174.00	249.61	2.22	4
2005	24.28	14.10	174.00	220.00	242.75	185.00	83.00	95.00	191.00	273.00	2.06	4
2006	24.28	16.13	191.00	211.00	242.75	190.00	55.00	125.00	183.00	259.00	3.39	5
2007	23.30	16.30	183.00	215.00	233.00	219.00	77.00	127.00	165.00	254.00	2.29	4
2008	24.60	15.50	165.00	238.00	246.00	198.00	87.00	127.00	171.00	246.00	1.30	2
x_{mi}	24.21	14.88	168.11	216.16	242.07	191.18	73.44	108.44	168.53	249.87	1.68	2.76
x_{sdi}	0.76	0.96	12.61	12.51	7.63	10.78	10.26	15.00	12.75	12.04	0.74	1.20

$\hat{y}$ 和 $\hat{y}d$ 分别为应用模型(4-3)和当地历年温度及降雨量预测的浙江杭州 1991 - 2008 年甜菜夜蛾的暴发指数值及其发生程度分级值；数据仅取自于杭州地区。 $\hat{y}$ and $\hat{y}d$ are forecast index value and grading value, respectively, of *Spodoptera exigua* outbreak of Hangzhou, Zhejiang between 1991 and 2008 by application of the model (4-3) and the local temperature and rainfall; the data are only from Hangzhou, Zhejiang.

3 讨论

(1)关于甜菜夜蛾局部发生程度与局部温度及降雨量变化的关系,已有多篇文献报道(韩兰芝等, 2003;李志敏等, 2008;薛敏生等, 2008),一般认为,温度越高,降雨量越少,甜菜夜蛾发生越重。而本文的主要不同关注点在于:广域温度和广域降雨量总变动对甜菜夜蛾大尺度总发生趋势有何影响规律?通过分析记录比较完整的我国 27 个省市代表性气象台观测点的总平均温度和总降雨量变化动态对甜菜夜蛾大尺度暴发频度的影响规律,初步找出了利用广域温度、降雨量或温雨组合值预测甜菜夜蛾大尺度或局部地区“暴发趋势指数”的方法及其定量模型。鉴于目前还没有找到一种如本文所选取的“广域温度和降雨量”一样的环境因子,其变动与甜菜夜蛾暴发指数变动有如此精确的定量同步关系,我们有理由认为,广域温度和降雨量变动可能是引起甜菜夜蛾大尺度暴发程度变动的主导因子或重要因子,这一新观点不仅为甜菜夜蛾,同时也为其他重大农业害虫广域发生趋势的中长期预测预报提供了新的思路和新的依据。

(2)一般认为,影响甜菜夜蛾发生量的外部因素包括温度、降雨量、天文(太阳黑子、南方涛动)、食料、天敌和抗药性等(罗礼智等, 2000;敖成光等, 2002),但本文为什么仅考虑了温度和降雨量因素,就能拟合出适合度极高(99%以上)的线性回归预测模型?笔者认为:

第一,本文研究的是甜菜夜蛾广域发生趋势,并不是局部地区的具体发生量,而温度和降雨量可能是影响甜菜夜蛾广域发生趋势的主导因子,况且食料(寄主)、天敌也受广域温度和降雨量的影响,而天文(太阳黑子、南方涛动)因子又往往是通过影响温度和降雨量对生物发生作用。还有,尽管食料是害虫的生存因子,但不太可能是影响甜菜夜蛾广域发生趋势的主导因子,主要原因在于:一方面,人类种植的甜菜夜蛾寄主作物是“甜菜夜蛾暴发”的必要条件;另一方面,甜菜夜蛾是一种多食性昆虫,凡是棉区、菜区或其他寄主区都有足够的食料供养甜菜夜蛾生存发展。况且人们最关心的正是寄主区甜菜夜蛾的发生动态,而对于寄主区甜菜夜蛾,其食料因子是相对稳定的,因此,不太可能因局部寄主面积或耕作制度的变动而导致广域的甜菜夜蛾暴发频次有如此规律的间歇性波动。

第二,对于局部地区甜菜夜蛾(包括其他农业害虫)的具体发生量,即使广域温度适宜大发生,但如果当地温度和降雨量不适宜、食料质量差、天敌多,害虫抗药性不强,害虫也可能不会大发生。也就是说,本文所建温度、降雨量线性回归预测模型,虽然对甜菜夜蛾广域发生趋势量预测适合度极高,但也许并不能准确预测局部地区甜菜夜蛾的具体发生量,因为对后者应该考虑当地其他影响因子及生存寄主的存在。

(3)本文所拟合的甜菜夜蛾广域发生趋势指数线性回归预测模型,虽然并未针对局部地区甜菜夜蛾具体发生量的预测,但实际上仍可通过计算其预测地区本地的自变量历史资料(温度与降雨量) x_i 的总体均数 $\bar{x}_{mi}$ 和总体标准差 s_{di} ,然后将之代入模型(4-2)中,得出适合于当地的标准化新模型,供各地预测下一年或当年甜菜夜蛾发生的可能轻重程度(具体方法见 2.6.3 所述)。

(4)为什么有些月份的温度、降雨量或其组合因素不能进入回归模型,这应当是一个较为复杂的问题。但归纳其原因可能有三:第一,有些月份的温度、降雨量或其组合因素在各年度间比较稳定,没有太多变化;第二,有些月份的温度、降雨量或其组合因素在年度间虽然有较大变化,但都在甜菜夜蛾生存发展的适宜范围之内;第三,逐步回归分析的特点是,引入回归方程的自变量的个数 n 与各变量贡献的显著性检验中所规定的 F 检验的临界值 F_1 与 F_2 的取值大小有关,所以没有进入回归模型的因素只是未达到显著临界值,而并非完全没有影响。

(5)本文的主要贡献在于,发现了一类能描述甜菜夜蛾广域发生程度的新评价指标(年频次、暴发指数及暴发程度的相对分级标准),并以此类指标为因变量,应用逐步回归分析方法,从 52 个温、雨因素(当年和上年 1-12 月各月及全年日均温和月均降雨量)中筛选出了具有显著回归影响($P < 0.05$ 或 0.01)的 10 个自变量因素进入回归模型,从而找出了能够预测广域甜菜夜蛾暴发趋势指数(或暴发程度)的温度、降雨量或其组合因素,并使其模型达到 99% 以上的历史符合率和预测准确度。该方法不仅为研究甜菜夜蛾的间歇性暴发机理并建立其大范围暴发预警模型提供了新途径,而且也可能改变在过去研究其它重大农业害虫的广域和长期动态趋势时,常常因得不到长期系统的历史虫情资料而无法进行的被动局面。

(6)李志敏等(2008)曾通过灰色系统分析认为, 季节间对甜菜夜蛾田间种群动态影响最大的是月平均温度, 年度间影响最大的是总降雨量。同样, 笔者更相信, 广域温度、降雨量因素与甜菜夜蛾暴发趋势指数的这种密切相关性, 并不是偶然的巧合, 而是必然的环境(温度和降雨量)作用于生物(甜菜夜蛾)的因果关系。

(7)本文所建甜菜夜蛾暴发指数(或暴发程度)预测模型, 虽然具有较高的历史符合率和预测能力, 但因未考虑虫源因素和食料因素, 故不适合于无甜菜夜蛾虫源地区或无甜菜夜蛾寄主作物地区使用。

致谢 感谢国家气象信息中心中国气象科学数据共享服务网提供相关气象原始数据。

参 考 文 献 (References)

- Ao CG, Wang JL, Zhu XQ, Jiang WF, 2002. Outbreak causes and agricultural control techniques of *Spodoptera exigua*. *Journal of Changjiang Vegetables*, (5): 28. [敖成光, 王金良, 朱晓群, 姜伟峰, 2002. 甜菜夜蛾灾变原因及农业防治技术. 长江蔬菜, (5): 28]
- Cao CT, Liu XF, Zang XB, Ye XR, Zhang GY, Mei H, Wang JX, Zhang XC, Zhao HZ, Zhu ZY, Nan H, 2005. Happened rule and control countermeasure of *Spodoptera exigua* in cotton field. *Jiangxi Plant Protection*, 28(1): 41–42. [曹春田, 刘新峰, 臧学斌, 冶晓瑞, 张国云, 梅红, 王俊香, 张秀春, 赵红真, 朱振营, 南华, 2005. 棉田甜菜夜蛾发生规律及防治对策. 江西植保, 28(1): 41–42]
- Chen FY, 2004. Study on reason of heavy occurrence of *Prodenia litura* and *Spodoptera exigua*. *Modern Vegetable*, (9): 36–37. [陈凤英, 2004. 斜纹夜蛾、甜菜夜蛾在江西重发生的原因初探. 当代蔬菜, (9): 36–37]
- Chen KJ, 1966. Preliminary observation of beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Shandong Agricultural Sciences*, (2): 23. [陈克健, 1966. 甜菜夜蛾的初步观察. 山东农业科学, (2): 23]
- Cheng YJ, Sun AP, Zhu XH, 2008. Occurrence feature and control technique of *Spodoptera exigua*. *Home of Peasants*, 247(12): 25–26. [程玉家, 孙艾萍, 朱秀红, 2008. 甜菜夜蛾的发生特点及防治技术. 农友之家, 247(12): 25–26]
- Deng JM, 1992. Beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner) outbreak of disaster in cotton fields. *Plant Protection*, 18(1): 32. [邓建明, 1992. 甜菜夜蛾在棉田爆发成灾. 植物保护, 18(1): 32]
- Ding YG, Liu JM, Yu JH, 2001a. Low frequency variability of interannual change patterns for global mean temperature during recent 100 years. *Journal of Tropical Meteorology*, 17(3): 193–203. [丁裕国, 刘晶森, 余锦华, 2001a. 近百年全球平均气温年际变化型态的低频变率特征. 热带气象学报, 17(3): 193–203]
- Ding YG, Yu JH, Shi N, 2001b. Quasi-biennial oscillation variability in interannual variance of the global surface temperature during the last 100-year period. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 25(1): 89–102. [丁裕国, 余锦华, 施能, 2001b. 近百年全球平均气温年际变率中的 QBO 长期变化特征. 大气科学, 25(1): 89–102]
- Ding YQ, Ge BM, 2001. Control technology of *Spodoptera exigua* in the cabbage field. *Plant Doctor*, 14(4): 34. [丁永青, 葛宝明, 2001. 秋白菜甜菜夜蛾的防治技术. 植物医生, 14(4): 34]
- Ding ZK, Xun XY, Lin SX, Su HS, 2007. Occurrence and control of *Spodoptera exigua* in cauliflower and pimiento. *China Vegetables*, (2): 59. [丁志宽, 荀贤玉, 林双喜, 苏恒山, 2007. 秋延辣椒和花椰菜上甜菜夜蛾的发生及防治. 中国蔬菜, (2): 59]
- Feng XH, 2009. Occurrence rule and integrated control technique of *Spodoptera exigua*. *Northwest Horticulture*, (5): 5–7. [冯小红, 2009. 甜菜夜蛾发生规律及综合防治技术. 西北园艺, (5): 5–7]
- Guo JP, Zhang JJ, Shi YJ, Yang SF, 2005. Life history and development duration of *Spodoptera exigua* in western area of Henan Province, China. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, (8): 63–65. [郭建平, 张建军, 史要强, 杨松芳, 2005. 甜菜夜蛾在豫西地区的生活史和不同温度发育历期研究. 河南农业科学, (8): 63–65]
- Han LZ, Zhai BP, Zhang XX, 2003. Life table of the laboratory population of *Spodoptera exigua* (Hübner) at different temperatures. *Acta Entomologica Sinica*, 46(2): 184–189. [韩兰芝, 翟保平, 张孝羲, 2003. 不同温度下的甜菜夜蛾实验种群生命表研究. 昆虫学报, 46(2): 184–189]
- Jiang JX, Wang DS, Zeng AP, 2004. Influence of incubation and inoculation temperatures on the epizootic of *Spodoptera exigua* nuclear polyhedrosis virus. *Acta Ecologica Sinica*, 24(8): 1724–1730. [蒋杰贤, 王冬生, 曾爱平, 2004. 温度对甜菜夜蛾核型多角体病毒流行的影响. 生态学报, 24(8): 1724–1730]
- Jiang XF, Luo LZ, Hu Y, 1999. Influence of larval diets on development, fecundity and flight capacity of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner). *Acta Entomologica Sinica*, 42(3): 270–276. [江幸福, 罗礼智, 胡毅, 1999. 幼虫食物对甜菜夜蛾生长发育、繁殖及飞行的影响. 昆虫学报, 42(3): 270–276]
- Lan YQ, Zhao SX, Wu G, 2005. Monitoring of insecticides resistance of *Spodoptera exigua* in Fujian Province, China. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 26(4): 90–94. [兰亦全, 赵士熙, 吴刚, 2005. 福建主要菜区甜菜夜蛾的抗药性监测. 热带作物学报, 26(4): 90–94]
- Li YQ, Peng HM, Yang FG, Xie FQ, 1998. Studies on the biological characteristics of *Spodoptera exigua* (Hübner). *Entomological Knowledge*, 35(3): 150–153. [李月秋, 彭宏梅, 杨凤刚, 谢凤琦, 1998. 甜菜夜蛾生物学特性的研究. 昆虫知识, 35(3): 150–153]
- Li ZM, He CX, Gao CL, Yang CR, Wang YH, Wang SQ, Li ZM, 2008. Grey system analysis of abiological factor influencing the beet armyworm *Spodoptera exigua* population. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 30(1): 148–151. [李志

- 敏, 何成兴, 高纯林, 杨存荣, 王艳红, 王顺乾, 李自命, 2008. 影响甜菜夜蛾种群数量的非生物因子的灰色系统分析. 云南大学学报(自然科学版), 30(1): 148–151]
- Lin ZF, Luo LZ, Pan XL, 2007. Insecticide abuse is an important cause of beet armyworm outbreak. *Chinese Bulletin of Entomology*, 44(3): 327–332. [林珠凤, 罗礼智, 潘贤丽, 2007. 杀虫剂使用失当是甜菜夜蛾大发生的重要原因. 昆虫知识, 44(3): 327–332]
- Liu XW, Li YS, Yang DJ, 2002. Occurrence characteristics and control countermeasure of *Spodoptera exigua* in the south area of Anhui Province, China. *China Cotton*, 29(2): 35–36. [刘轩武, 李延山, 杨德金, 2002. 皖东地区甜菜夜蛾在棉花上的发生特点及治理对策. 中国棉花, 29(2): 35–36]
- Luo LZ, Cao YZ, Jiang XF, 2000. Analysis of trend and harm characteristics of beet armyworm *Spodoptera exigua* (Hübner). *Plant Protection*, 26(3): 37–39. [罗礼智, 曹雅忠, 江幸福, 2000. 甜菜夜蛾发生危害特点及其趋势分析. 植物保护, 26(3): 37–39]
- Ma J, Chen YN, Xiao SJ, Mo GZ, 1999. Influence of temperature on the increase of laboratory population of *Spodoptera exigua*. *Journal of Hunan Agricultural University*, 25(4): 308–311. [马骏, 陈永年, 肖素娟, 莫光珍, 1999. 温度对甜菜夜蛾实验种群增长的影响. 湖南农业大学学报, 25(4): 308–311]
- Qian ZG, 1995. Occurrence and control of *Spodoptera exigua* in cotton region. *China Rural Science & Technology*, (5): 14. [钱长根, 1999. 甜菜夜蛾在棉区的发生与防治. 中国农村科技, (5): 14]
- Ren LH, Hao W, Wang JC, 2005. Approach on the overwintering of *Spodoptera exigua* in southwest of Shandong. *Chinese Bulletin of Entomology*, 42(1): 79–81. [任兰花, 郝伟, 王继藏, 2005. 甜菜夜蛾在鲁西南地区越冬问题的初步探讨. 昆虫知识, 42(1): 79–81]
- Si SY, Zhou LL, Wang Y, Liu XM, 2009. Monitoring of insecticide resistance of *Spodoptera exigua* field populations in Hubei Province. *Plant Protection*, 35(1): 114–117. [司升云, 周利琳, 望勇, 刘小明, 2009. 湖北省甜菜夜蛾田间种群抗药性监测. 植物保护, 35(1): 114–117]
- Sun J, Liu XW. 2006. Occurrence and control of *Spodoptera exigua* in chrysanthemum. *Modern agriculture Science & Technology*, (17): 90. [孙军, 刘轩武, 2006. 菊花田甜菜夜蛾的发生及防治. 现代农业科技, (17): 90]
- Suo SH, Sun XH, Yan KF, Ma JX, 2005. Technology and application of *Spodoptera exigua* prediction and forecast. *China Plant Protection*, (5): 31–32. [索世虎, 孙雪花, 闫克锋, 马建霞, 2005. 豫西地区甜菜夜蛾预测预报技术及其应用的研究. 中国植保导刊, (5): 31–32]
- Wang HS, Li JY, Tong JW, Li YL, 2004. Rampancy cause and non-polluted control countermeasure of *Spodoptera exigua*. *Vegetable*, (6): 20–22. [王合松, 李九英, 佟建伟, 李艳丽, 2004. 甜菜夜蛾猖獗原因及无公害治理对策. 蔬菜, (6): 20–22]
- Wang HS, Xu HF, Cui F, Xu YY, Zhou Z, 2004. Effects of temperature on mating behavior and fecundity of beet armyworm, *Spodoptera exigua* (Hübner). *Acta Ecologica Sinica*, 24(1): 162–166. [王兹晟, 徐洪富, 崔峰, 许永玉, 周真, 2004. 温度对甜菜夜蛾生殖行为及生殖力的影响. 生态学报, 24(1): 162–166]
- Wang KY, Jiang XY, Yi MQ, Chen BK, 2001. Studies on resistance change and management strategy of *Spodoptera exigua*. *Pesticides*, 40(6): 29–32. [王开运, 姜兴印, 仪美芹, 陈丙坤, 2001. 甜菜夜蛾的抗药性变化及治理对策的研究. 农药, 40(6): 29–32]
- Wang Y, 2005. Applied Time Series Analysis. China Renmin University Press, Beijing. [王燕, 2005. 应用时间序列分析. 北京: 中国人民大学出版社]
- Wu CC, Wang M, 2003. Effect of different diets on the susceptibility of insecticides and the activity of detoxifying enzymes in the beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 5(1): 56–60. [吴承春, 王沫, 2003. 不同食料对甜菜夜蛾药剂敏感性及解毒酶活性的影响. 农药学报, 5(1): 56–60]
- Wu SX, 1992. Beet armyworm outbreak of disaster in Yingtan City of Jiangxi Province. *Plant Protection*, (6): 51. [吴淑秀, 1992. 江西省鹰潭市甜菜夜蛾暴发成灾. 植物保护, (6): 51]
- Wu WH, Fu HP, Wu XD, Dong WH, Xu SL, 2007. Forecasting the population dynamics of *Cricetulus barabansis* and *Meriones unguiculatus* by time series method. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 28(4): 6–11. [武文华, 付和平, 武晓东, 董维惠, 徐胜利, 2007. 应用时间序列分析法预测黑线仓鼠和长爪沙鼠种群数量. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 28(4): 6–11]
- Xu GQ, Meng WL, Wang LJ, Yang L, An GR, Wang DW, Zhu ML, Zhao JQ, 2000. The burst of *Laphygma exigua* in Liaoning Province. *Liaoning Agricultural Sciences*, (6): 53. [许国庆, 孟未来, 王丽娟, 杨蕾, 安桂荣, 王德伟, 褚茗莉, 赵季秋, 2000. 甜菜夜蛾在辽宁爆发成灾. 辽宁农业科学, (6): 53]
- Xu JH, Guan X, Huang ZP, Yu ZQ, 1999. Effect of different combinations of temperature and humidity on the development and fecundity of *Spodoptera exigua*. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 10(3): 335–337. [徐金汉, 关雄, 黄志鹏, 余朝勤, 1999. 不同温湿度组合对甜菜夜蛾生长发育及繁殖力的影响. 应用生态学报, 10(3): 335–337]
- Xu WH, Wang RM, Zhou RQ, 2006. Infestation regularity and new control techniques of *Spodoptera exigua* in Yancheng cropping area. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 18(5): 62–65. [徐文华, 王瑞明, 周汝芹, 2006. 盐城农区甜菜夜蛾的灾变规律与监控新技术研究. 江西农业学报, 18(5): 62–65]
- Xue MS, Gao JS, Li KX, 2008. Reasons of affecting occurrence degree and forecast formula of *Spodoptera exigua*. *Anhui Agriculture*, (16): 117, 127. [薛敏生, 高九思, 李可兴, 2008. 影响甜菜夜蛾发生程度的原因及预测模式研究. 现代农业科技, (16): 117, 127]
- Yao ST, Zheng YL, Chen GX, Chen LY, 2008. Population dynamics of *Laphygma exigua* Hübner and its application in forecasting and prediction. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 20(7): 65–66, 70. [姚士桐, 郑永利, 陈国祥, 陈利英, 2008. 甜菜夜蛾种群消长规律及

- 其在预测预报上的应用. 江西农业学报, 20(7): 65-66, 70]
- Yuan YD, Wang DS, Yu WJ, 2006. Resistance of beet armyworm (*Spodoptera exigua*) to insecticides and its control. *Acta Agriculturae Shanghai*, 22(1): 42-45. [袁永达, 王冬生, 於文俊, 2006. 上海地区甜菜夜蛾的抗药性及防治. 上海农业学报, 22(1): 42-45]
- Zhang WT, 2002. Statistical Analysis Tutorial (Advanced Chapter) of SPSS 11.0. Beijing Hope Electronic Press, Beijing. [张文彤, 2002. SPSS 11.0 统计分析教程(高级篇). 北京: 北京希望电子出版社]
- Zhao JZ, Wu SC, 1995. Resistance to pesticide and its management of *Spodoptera exigua*. *Pesticide Science and Administration*, (2): 22-23, 41. [赵建周, 吴世昌, 1995. 甜菜夜蛾的抗药性及其治理. 农药科学与管理, (2): 22-23, 41]
- Zhao ZC, Wang SW, Xu Y, Ren GY, Luo Y, Gao XJ, 2005. Attribution of the 20th century climate warming in China. *Climatic and Environmental Research*, 10(4): 808-817. [赵宗慈, 王绍武, 徐影, 任国玉, 罗勇, 高学杰, 2005. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因. 气候与环境研究, 10(4): 808-817]
- Zhu PJ, 2004. Occurrence and control of *Spodoptera exigua* and *Prodenia litura* in scallion. *Shanghai Vegetables*, (2): 53. [朱佩瑾, 2004. 大葱甜菜夜蛾与斜纹夜蛾的发生与防治. 上海蔬菜, (2): 53]
- Zhu SD, Ren L, Qian K, 2003. Effects of temperature on the population outbreak of beet armyworm, *Spodoptera exigua*. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Sciences Edition)*, 24(1): 75-78. [祝树德, 任璐, 钱坤, 2003. 温度对甜菜夜蛾实验种群的影响. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 24(1): 75-78]

(责任编辑: 袁德成)